

Matjaž Zadravec, Andrej Olenšek, Zlatko Matjačić

Vadba ravnotežja na podlagi motenj v simuliranem okolju javnega prometa

Povzetek. Padci med uporabo javnega prevoza predstavljajo pomembno tveganje, zlasti za starejše osebe in posameznike z motnjami ravnotežja. V tej študiji smo razvili in ovrednotili vadbeni sistem, ki združuje Stewartovo ploščad in poglobljeno navidezno resničnost (NR) za simulacijo destabilizacijskih pogojev, značilnih za javni prevoz. Sistem je bil najprej preizkušen na primeru, ki je pokazal, da naraščajoče senzorične in mehanske motnje povzročajo postopno povečanje posturalne nestabilnosti, pri čemer se je kot najzahtevnejši izkazal pogoj s hkratno uporabo NR, gibanjem Stewartove ploščadi in dodanim stohastičnim gibanjem le-te. Nato so trije udeleženci (dva zdrava, eden z motnjo ravnotežja) opravili enkratno vadbo ravnotežja na podlagi motenj. Posturalno kontrolo smo ovrednotili z analizo kazalnikov središča pritiska. Zdrava udeleženca sta skozi vadbeni poligon izkazovala prilagoditev ravnotežja, udeleženec z motnjo ravnotežja pa je kazal dinamično nestabilnost, kar poudarja potrebo po daljših in individualno prilagojenih rehabilitacijskih protokolih. Rezultati kažejo, da lahko tovrstni trening učinkovito izboljša posturalno kontrolo v dinamičnih okoljih, vendar so za osebe s senzoričnimi primanjkljaji potrebne nadaljnje raziskave.

Ključne besede: vadba ravnotežja, navidezna resničnost, Stewartova ploščad, posturalna stabilnost, javni promet, preprečevanje padcev.

Perturbation-Based Balance Training in a Simulated Public Transportation Environment

Abstract. Falls during public transportation pose a significant safety risk, particularly for older adults and individuals with impaired balance. This study presents the development and evaluation of a balance training system that integrates a 6-degree-of-freedom Stewart platform with immersive virtual reality (NR) to simulate destabilising conditions encountered in public transport. The system was first evaluated in a single-subject case study across multiple experimental conditions, demonstrating that increasing sensory and mechanical perturbations resulted in progressively greater postural instability, whereby the combined NR, platform movement and stochastic floor movement condition was the most demanding. A single-session perturbation-based balance training (PBT) protocol was subsequently conducted with three participants (two healthy, one participant with a vestibular disorder). Postural stability was assessed using Center of Pressure-based metrics derived from the instrumented Stewart platform. Both healthy participants showed a good postural adaptation during the training course, whereas the participant with vestibular impairment showed unstable dynamical balance and limited short-term adaptation. These findings indicate that NR-enhanced PBT can effectively challenge and improve postural control in dynamic environments, while also highlighting the need for prolonged or individualised training protocols for individuals with sensory impairments.

Key words: balance training, virtual reality, Stewart platform, postural stability, public transport, fall prevention.

■ Infor Med Slov 2025; 30(1-2): 8-14

Institucija avtorjev / Authors' institution: Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije Soča, Ljubljana (MZ, AO, ZM).

Kontaktna oseba / Contact person: dr. Matjaž Zadravec, URI Soča, Linhartova 51, 1000 Ljubljana, Slovenija. E-pošta / E-mail: matjaz.zadravec@ir-rs.si.

Prispelo / Received: 10. 12. 2025. Sprejeto / Accepted: 8. 1. 2026.

Uvod

Padci v javnem prometu predstavljajo znatno tveganje za starejše odrasle, zlasti ob nenadnih premikih vozila, kot so pospeševanje, zaviranje ali sunkoviti zavoji. V ZDA letno zabeležijo približno 37.000 obiskov urgentnih oddelkov zaradi poškodb, ki nastanejo pri vstopanju ali izstopanju iz vozil, pogosto kot posledica nestabilnosti v prehodnih fazah, kot sta hoja do sedeža ali priprava na izstop.¹ Evropske študije dodatno potrjujejo to problematiko, saj tretjino poškodb v avtobusih pripisujejo vstopanju in izstopanju.² Takšni dogodki pogosto izhajajo iz posturalnih motenj, ki nastanejo zaradi neusklajenih senzoričnih vhodov (vidnih, vestibularnih in proprioceptivnih signalov) med nenadnimi manevri javnega prevoza (avtobusa, vlaka ipd.).³

Za preučevanje ponovne vzpostavitve ravnotežja v takih okoliščinah so raziskovalci uporabili različne sisteme za povzročanje motenj, ki posnemajo realne destabilizacijske pogoje.⁴ Razvite so bile npr. premične ploščadi s tremi stopnjami prostosti, sposobne nadzorovanih translacijskih in rotacijskih motenj, ter sistemi za simulacijo pospeševanja in zaviranja avtobusov.^{5,6} Ti sistemi kažejo, da se strategije ravnotežja spreminjajo glede na velikost in smer motnje ter da večje motnje zahtevajo hitrejši kompenzacijske odzive.⁷ Vendar pa večina teh sistemov ne vključuje poglobljene navidezne resničnosti (NR), ki bi lahko bila pomembna za preučevanje senzoričnih konfliktov, značilnih za dinamična okolja, kot je vožnja z avtobusom.

NR lahko povzroči vidno-vestibularna neskladja, ki povečajo posturalno nestabilnost. Ugotovljeno je bilo, da vidno gibanje v NR poveča zanašanje na proprioceptivne informacije, kar poudarja potrebo po združevanju fizičnih motenj z NR za boljšo simulacijo vsakdanjih izzivov.⁸ Na odzive ravnotežja vpliva tudi spol in starost: ženske se pogosteje zanašajo na strategije gležnjev, moški na prilagoditve v kolkih,⁹ starejši odrasli pa zaradi starostnih sprememb v senzomotorični integraciji kažejo zmanjšano prilagodljivost.¹⁰ Kljub tem spoznanjem le malo študij celostno simulira kompleksne senzorične in mehanske zahteve javnega prometa, kar omejuje razvoj ekološko veljavnih intervencij.

Vadba ravnotežja na osnovi motenj (angl. *perturbation-based balance training – PBT*) se je izkazala kot obetaven pristop za izboljšanje človekove dinamične stabilnosti.¹¹⁻¹³ Predlagana je bila tudi uporaba simuliranih motenj v javnem prometu za izboljšanje reaktivnega ravnotežja pri starejših.¹⁴ Vendar obstoječi protokoli PBT pogosto ne vključujejo

poglobljene NR ali visokozmogljivih mehanskih sistemov, kar omejuje njihovo sposobnost celostne ponazoritve vidnih, vestibularnih in proprioceptivnih zahtev realnega okolja.

Cilj študije

Cilj naše raziskave je bil izdelati okolje, ki združuje Stewartovo ploščad in NR ter povezuje fizične motnje (gibanje ploščadi s 6 stopnjami prostosti) s poglobljeno NR (vožnja avtobusa), da bi posnemali destabilizacijske pogoje v javnem prometu. Ploščad omogoča generiranje stohastičnih gibanj podlage in motenj, značilnih za avtobus, kot so vožnja čez hitrostne ovire in zavoji. Raziskava se osredotoča na dva cilja:

- ovrednotiti izvedljivost hibridnega sistema za simulacijo različnih dinamičnih scenarijev ravnotežja pri stoji ter
- oceniti učinkovitost enkratnega PBT s spremljanjem kazalnikov posturalnega odziva pri treh posameznikih.



Slika 1 Udeleženec meritve stoji na Stewartovi ploščadi, medtem ko z očali za navidezno resničnost opazuje poglobljeno navidezno resničnost vožnje z avtobusom.

Metode

Stewartova ploščad

Po meri izdelana Stewartova ploščad na sliki 1, razvita v laboratoriju službe za raziskave in razvoj URI Soča, je paralelni robot s šestimi prostostnimi stopnjami, ki ga krmili krmilnik Beckhoff TwinCAT3. Ploščad omogoča hitrosti do 200 mm/s in pospeške do 2 m/s^2 . Premer ploščadi je 123 cm; pritrjena je na treh senzorjih sile, ki merijo navpično reakcijsko silo podlage in omogočajo izračun središča pritiska (angl. *center of pressure – CoP*) s frekvenco vzorčenja 200 Hz. Za izboljšanje rehabilitacijske izkušnje je v sistem integrirana poglobljena NR z uporabo očal Meta Quest II, ki zagotavljajo dinamično in interaktivno vadbno okolje.

Naključno gibajoča se podlaga

Simulacija gibajoče se podlage je bila izvedena z naključnim gibanjem Stewartove ploščadi, ki posnema stohastično gibanje tal, značilno za vožnjo z avtobusom. Gibanje je bilo porazdeljeno po petih koordinatah prostora: treh translacijskih (X, Y, Z) in dveh rotacijskih (α in β), medtem ko je rotacija okoli osi Z ostala fiksna. Translacije so znašale od -0,05 m do 0,05 m v smereh X in Y ter od -0,02 m do 0,02 m v smeri Z. Rotacijski gibi so se gibal med -1° in 1° za osi α in β . Hitrosti gibanja so znašale 10-20 mm/s za translacije in $1-2^\circ/\text{s}$ za rotacije.

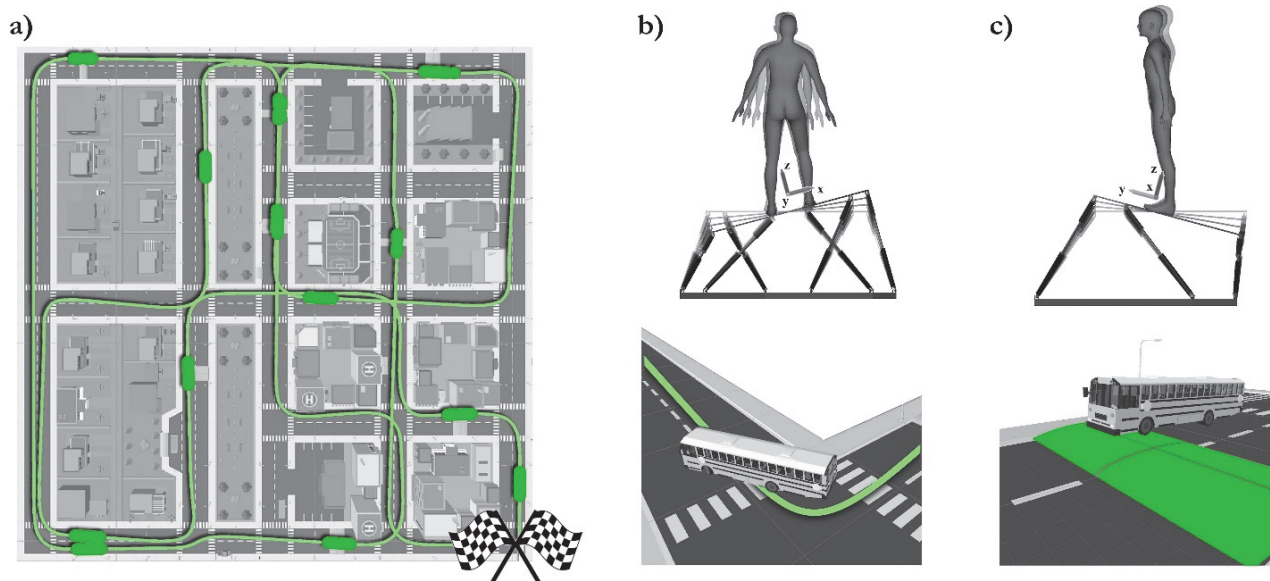
Udeleženci

V raziskavi so sodelovali trije moški udeleženci: dva zdrava posameznika (stara 56 in 41 let, telesne višine 191 cm in 181 cm ter telesne mase 110 kg in 80 kg) brez znanih motenj ravnotežja ter en udeleženec (star 45 let, visok 172 cm, telesna masa 80 kg) z diagnosticirano parezo vestibularnega živca na levi strani, kar je povzročalo blago motnjo ravnotežja.

Najprej je starejši zdravi udeleženec preizkusil ploščad v različnih merilnih pogojih. Nato so vsi trije udeleženci opravili enkratno vadbo ravnotežja. Vsi so sodelovali prostovoljno in podali pisno privolitev po poučitvi. Zaradi varnosti so bili opremljeni z varovalnim pasom, ki bi preprečil padec ob morebitni izgubi ravnotežja.

Navidežno okolje

Vožnja z avtobusom v navideznem okolju je umeščena v mestno okolje in vključuje različne destabilizacijske elemente vzdolž ceste, kot so hitrostne ovire, zavoji v ovinke, izogibanje oviram in cestne luknje. Avtobus opravi celoten krog po mestu v petih minutah. Njegovo gibanje je neposredno preslikano na Stewartovo ploščad in zagotavlja simulacijo gibanja v realnem času. Ob vožnji čez hitrostno oviro ali luknjo se ustrezno spremeni naklon ploščadi (angl. *pitch*), pri zavojih pa se prilagodi nagib vstran (angl. *roll*), kot je prikazano na sliki 2. Za dodatno obogatitev NR so bili vključeni tudi mestni zvoki in glasbena podlaga.



Slika 2 Simulirano okolje javnega prometa. Avtobus v navideznem okolju se glede na Stewartovo ploščad giblje vzdolž y osi, pri čemer je njegovo gibanje izpostavljeno različnim destabilizacijskim dogodkom. (a) Prikaz začetne poti avtobusa skozi mesto (svetlo zelena) in hitrostne ovire (odebeljene temno zelene črte) s štartom in ciljem v spodnjem desnem vogalu; (b) ponazoritev zavijanja vozila z ustreznim bočnim nagibom ploščadi; (c) prevoz vozila čez hitrostno oviro.

Eksperimentalni protokol

Meritve so potekale v dveh fazah. V prvi fazi je bila izvedena študija primera na enem udeležencu, pri kateri smo CoP analizirali v štirih pogojih:

- STOJA: 5-minutna mirna stoja brez očal za NR, z odprtimi očmi in brez gibanja ploščadi;
- NR: 5-minutni navidezni avtobusni prizor z uporabo očal za NR in brez gibanja ploščadi;
- NR + GIBANJE: udeleženec je uporabljal očala za NR, ploščad pa se je gibala skladno z gibanjem avtobusa;
- NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE: kombinacija prejšnjega pogoja z dodatnim stohastičnim gibanjem ploščadi.

V drugi fazi so vsi trije udeleženci opravili vadbo ravnotežja v sledečem pogoj, ki se je izkazal za najzahtevnejšega:

NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE

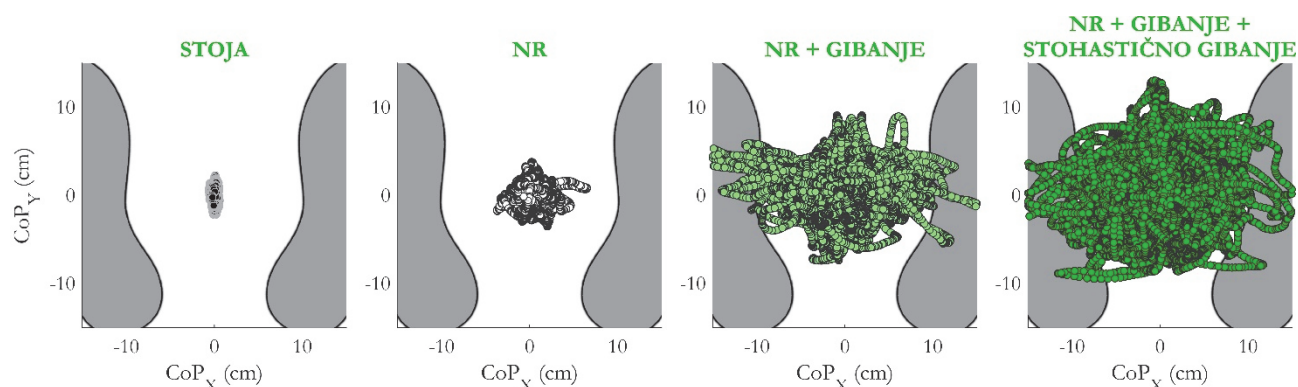
Vadba je potekala v eni seji in je vključevala več zaporednih krogov navidezne vožnje z avtobusom po mestu. Za vsak krog so bili izračunani kazalniki ravnotežja, opisani v nadaljevanju.

Obdelava podatkov

Primarni izhodni signal sistema je bilo središče pritiska. Iz amplitude CoP (enačba 1) so bili izračunani standardni odklon (enačba 2), povprečna hitrost gibanja (enačba 3) in njegova površina gibanja. Povprečna hitrost gibanja CoP je bila določena kot razmerje med celotno dolžino poti CoP in trajanjem meritve t_f . Izračunana je bila tudi površina v obliki elipse, ki zajema 95% premikov CoP. Analiza je bila narejena v programskem okolju MATLAB 2024a.

$$CoP = \sqrt{CoP_x^2 + CoP_y^2} \quad (1)$$

$$SO\ CoP = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (CoP - \overline{CoP})^2} \quad (2)$$



Slika 3 Gibanje točke CoP med stopali na študiji primera enega udeleženca v štirih različnih pogojih.

$$\text{Hitrost gibanja CoP} =$$

$$\frac{1}{t_f} \sum_{i=2}^N \sqrt{(CoP_{x_i} - CoP_{x_{i-1}})^2 + (CoP_{y_i} - CoP_{y_{i-1}})^2} \quad (3)$$

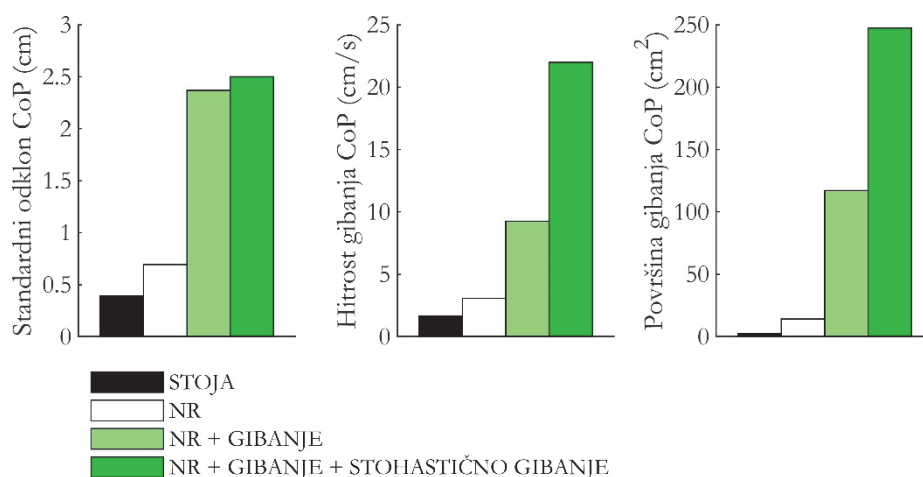
Rezultati

Ravnotežje v različnih merilnih pogojih

Rezultati s slike 3 in slike 4 kažejo, da se je z naraščajočo kompleksnostjo pogojev povečala posturalna nestabilnost. Pogoju STOJA je izkazoval najmanjše premike CoP, pogoju NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE pa je povzročil največje gibanje, kar kaže na največjo nestabilnost. Hitrost gibanja CoP se je postopno povečevala, pri čemer je imela NR nekoliko večji destabilizacijski učinek kot sama STOJA. Pri gibanju ploščadi (NR + GIBANJE) ter dodanem naključnem gibanju podlage se hitrost gibanja CoP še znatno poveča. Največja površina gibanja CoP je bila pričakovano opazna v najzahtevnejšem pogoj, kar odraža povečane posturalne prilagoditve in pogostejše korekcijske odzive telesa. Približno polovico manjša površina (tudi hitrost gibanja) CoP je bila potrebna pri pogoj NR + GIBANJE; ostala pogoja sta imela zanemarljive učinke na CoP.

Rezultati vadbe

Rezultati vadbe vseh treh udeležencev so navedeni v tabeli 1. Pri obeh zdravih udeležencih je bilo opazno izboljšanje ravnotežja skozi zaporedne kroge vadbe. Zmanjševali so se standardni odklon CoP, hitrost in površina gibanja ter skupna moč spektra. Pri starejšem udeležencu se je dodatno znižala tudi srednja frekvenca, kar kaže na bolj stabilne in manj sunkovite korekcije. Udeleženec z motnjo ravnotežja je izkazoval trajno višje vrednosti vseh kazalnikov in minimalno izboljšanje, srednja frekvenca pa se je celo povečevala, kar kaže na večji živčni napor. Pri tem udeležencu se je pojavila tudi blaga kibernetska slabost, zato je vadbo zaključil predčasno.



Slika 4 Kazalniki ravnotežja (standardni odklon, hitrost in površina gibanja CoP) v študiji primera enega udeleženca v štirih različnih pogojih.

Razprava

Ugotovitve študije kažejo, da je posturalna stabilnost izrazito odvisna od hkratne integracije mehanskih motenj in poglabljene navidezne resničnosti.

Primerjava merilnih pogojev

Rezultati jasno kažejo vpliv različnih merilnih pogojev na posturalno stabilnost. Pričakovano je z naraščanjem zahtevnosti naloge naraščalo tudi posturalno nihanje udeleženca, pri čemer je pogoj NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE

predstavljal največji izziv, kar potrjujejo povišani kazalniki središča pritiska. Standardni odklon CoP, hitrost gibanja in površina gibanja so se postopno povečevali, kar kaže na zmanjšano stabilnost v zahtevnejših pogojih. Poudariti je treba, da je imelo gibanje CoP pri pogoju NR večje amplitude kot pri pogoju STOJA, kar izpostavlja vlogo vidnih motenj pri nadzoru ravnotežja, saj vidna motnja brez zunanje fizične motnje prav tako lahko povzroči posturalne odzive. Velika razlika se je pokazala tudi med pogojem NR + GIBANJE ter

NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE, kjer se vpliv dodanega stohastičnega gibanja ploščadi izrazito pozna v gibanju CoP, ki je projekcija človekovega težišča. S tem so potrjene ugotovitve predhodnih raziskav, da kombinirane senzorične in mehanske motnje bistveno povečajo zahteve po posturalnem nadzoru.^{3,8} Opažena nestabilnost kaže na potrebo po vadbenih pristopih, ki posnemajo realne destabilizacijske razmere vsakdanjega okolja, zlasti pri populacijah z večjim tveganjem za padce.

Vpliv vadbe na posturalno stabilnost

Enkratna vadbena seja je razkrila izrazite individualne razlike v prilagoditvi. Oba zdrava udeleženca sta

izkazala izboljšanje ravnotežja, vendar z različno dinamiko. Pri prvem udeležencu je bilo zaznati postopno in dosledno zmanjševanje kazalnikov CoP, kar kaže na postopno prilagoditev in izboljšanje posturalni nadzor. Drugi zdravi udeleženec je izkazoval boljšo začetno stabilnost in splošen upad kazalnikov nestabilnosti, vendar z večjim nihanjem med posameznimi krogi. Nasprotno je udeleženec z motnjo ravnotežja izkazoval postopno povišane kazalnike nestabilnosti z minimalnim izboljšanjem skozi vadbo. Te ugotovitve poudarjajo potrebo po daljših ali posebej prilagojenih programih vadbe ravnotežja pri osebah z motnjami ravnotežja.

Pomen za vadbo ravnotežja na osnovi motenj

Rezultati dodatno potrjujejo pomen vadbe ravnotežja na osnovi motenj (PBT) za izboljšanje dinamične stabilnosti. Postopno izboljšanje, opaženo pri zdravih udeležencih, kaže, da izpostavljenost nadzorovanim destabilizacijskim pogojem spodbuja učinkovitejše mehanizme posturalnega nadzora. To je še posebej pomembno za starejše odrasle, ki so v nepredvidljivih okoljih, kot je javni prevoz, izpostavljeni povečanemu tveganju za padce. Integracija poglobljene NR in mehanskih motenj v predstavljeni študiji predstavlja nov in ekološko veljaven pristop k vadbi ravnotežja, ki presega omejitve klasičnih statičnih vaj.⁵ Pri osebi z motnjo ravnotežja odsotnost izrazitega izboljšanja po eni sami vadbeni seji nakazuje, da so potrebni daljši ali postopno stopnjevani vadbeni protokoli. Prihodnje raziskave bi morale preučiti prilagodljive vadbene strategije s postopnim povečevanjem intenzivnosti in trajanja motenj ter vključevanjem sprotne biološke povratne informacije ali individualiziranih podpornih mehanizmov za optimizacijo vadbenih učinkov.

Tabela 1 Rezultati vadbe na Stewartovi ploščadi pri pogoju NR + GIBANJE + STOHAŠTIČNO GIBANJE.

Udeleženec	Standardni odklon CoP (cm)			Hitrost gibanja CoP (cm/s)			Površina gibanja CoP (cm ²)		
	1. krog	2. krog	3. krog	1. krog	2. krog	3. krog	1. krog	2. krog	3. krog
Oseba A (zdrava)	2,71	2,64	22,58	22,58	20,56	16,52	271	259	233
Oseba B (zdrava)	2,41	2,34	16,56	16,56	16,73	15,24	207	200	178
Oseba C (motnja ravnotežja)	2,56	2,57	28,10	28,10	27,21	25,96	272	253	266

Omejitve in nadaljnje usmeritve

Najpomembnejša omejitev študije je majhno število udeležencev, ki omejuje posploševanje rezultatov. Nadaljnje raziskave bi morale vključevati večje in demografsko raznolike skupine z različnimi motnjami ravnotežja. Poleg tega smo analizirali podatke le na podlagi enega treninga, zato dolgoročni učinki za tovrstno vadbo ravnotežja ostajajo neznani. Longitudinalni pristop bi omogočil boljše razumevanje trajnosti pridobljenih izboljšav in optimalnega trajanja vadbe.

Čeprav je okolje NR uspešno simuliralo dinamične razmere javnega prevoza, bi bilo mogoče ekološko veljavnost dodatno izboljšati z vključitvijo nepredvidljivih gibov drugih potnikov ali bolj raznolikih pospeškov avtobusa. Razna držala, kot jih poznamo v avtobusih, v trenutni postavitvi niso bila vključena, saj so bile amplitude gibanja razmeroma majhne, so pa bila na voljo varnostna držala nekoliko stran od človeka, če bi med meritvami prišlo do hipne izgube ravnotežja. V prihodnje naj bi bila vključena tudi tipična avtobusna držala, ki bi bila tudi opremljena s senzorji sile. Nenazadnje bi analiza mišične aktivnosti in kognitivne obremenitve med vadbo omogočila globlji vpogled v nevromišične strategije nadzora človekovega ravnotežja.

Zaključek

Študija potrjuje izvedljivost in potencial integracije poglobljene navidezne resničnosti z mehanskimi motnjami za simulacijo realnih izzivov ravnotežja v javnem prometu. Vadba ravnotežja na podlagi motenj se je izkazala za učinkovito pri zdravih posameznikih, za osebe z motnjami ravnotežja pa so potrebni daljši in bolj postopni programi. Ugotovitve prispevajo k razvoju naprednih strategij preprečevanja padcev v dinamičnih okoljih in predstavljajo osnovo za nadaljnje raziskave.

Reference

- Dellinger AM, Boyd RM, Haileyesus T: Fall injuries in older adults from an unusual source: Entering and exiting a vehicle. *J Am Geriatr Soc* 2008; 56(4): 609-614. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2008.01638.x>
- Albertsson P, Falkmer T: Is there a pattern in European bus and coach incidents? A literature analysis with special focus on injury causation and injury mechanisms. *Accid Anal Prev* 2005; 37(2): 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.03.006>
- Krašna S, Keller A, Linder A *et al.*: Human response to longitudinal perturbations of standing passengers on public transport during regular operation. *Front Bioeng Biotechnol* 2021; 9: 680883. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.680883>
- Zadravec M, Olenšek A, Matjačić Z: Emulation of hill walking and turning on balance assessment robot: A preliminary study. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2019; 2019: 7-12. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779474>
- Chen C, Lee JY, Horng RF, Lou SZ, Su FC: Development of a three-degrees-of-freedom moveable platform for providing postural perturbations. *Proc Inst Mech Eng H* 2009; 223(1): 87-97. <https://doi.org/10.1243/09544119JHEM482>
- Favier CD, Deane JA, McGregor AH, Phillips ATM: Design and preliminary testing of a low-cost balance perturbation system for the evaluation of real life postural adjustment on public transport. *J Med Eng Technol* 2019; 43(6): 356-362. <https://doi.org/10.1080/03091902.2019.1673845>
- Sinitksi EH, Terry K, Wilken JM, Dingwell JB: Effects of perturbation magnitude on dynamic stability when walking in destabilizing environments. *J Biomech* 2012; 45(12): 2084-2091. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.05.039>
- Chander H, Kodithuwakku Arachchige SNK, Hill CM *et al.*: Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behav Sci (Basel)* 2019; 9(11): 113. <https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Xu JC, Silvano AP, Keller A *et al.*: Identifying and characterizing types of balance recovery strategies among females and males to prevent injuries in free-standing public transport passengers. *Front Bioeng Biotechnol* 2021; 9: 670498. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.670498>
- Marchesi G, De Luca A, Squeri V *et al.*: A lifespan approach to balance in static and dynamic conditions: The effect of age on balance abilities. *Front Neurol* 2022; 13: 801142. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.801142>
- Matjačić Z, Zadravec M, Olenšek A: Feasibility of robot-based perturbed-balance training during treadmill walking in a high-functioning chronic stroke

- subject: A case-control study. *J Neuroeng Rehabil* 2018; 15(1): 32.
<https://doi.org/10.1186/s12984-018-0373-z>
12. Zadravec M, Olenšek A, Rudolf M, Bizovičar N, Goljar N, Matjačić Z: Assessment of dynamic balancing responses following perturbations during slow walking in relation to clinical outcome measures for high-functioning post-stroke subjects. *J Neuroeng Rehabil* 2020; 17(1): 85.
<https://doi.org/10.1186/s12984-020-00710-5>
13. Mansfield A, Aquil A, Danells CJ *et al.*: Does perturbation-based balance training prevent falls among individuals with chronic stroke? A randomised controlled trial. *BMJ Open* 2018; 8(8): e021510.
<https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-021510>
14. Lindemann U, Szuka K, Becker C, Klenk J: Perturbation in public transport as a basic concept for perturbation-based balance training for fall prevention. *Z Gerontol Geriatr* 2021; 54(6): 571-575.
<https://doi.org/10.1007/s00391-020-01755-w>